

Experimental and numerical study of coupled water and heat transport in the freezing ground

Doctoral Thesis**Author(s):**

Zhou, Xiaohai

Publication date:

2014

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010445315>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 22417

Experimental and Numerical Study of Coupled Water and Heat Transport in the Freezing Ground

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Xiaohai Zhou

Master of Engineering, Nanjing University

born on 21.12.1985

citizen of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Wolfgang Kinzelbach, examiner

Prof. Dr. Fritz Stauffer, co-examiner

Prof. Dr. Sarah Springman, co-examiner

Prof. Dr. Yan Jin, co-examiner

Prof. Dr. Jian Zhou, co-examiner

2014

Abstract

Mountain permafrost is highly susceptible to the effects of climate warming, because its thermal regime is close to 0 °C. It is usually manifested in the landform of rock glaciers. Former studies established that hydrology is a key driver in mountain permafrost degradation. Hydrology influences ground thermal regime through snow, water and ice. Macroscopically, water and heat transport are coupled during periods of snowmelt, as melt water percolates into the ground and results in rapid warming of the soil to 0 °C and an increase of unfrozen water. Microscopically, during freezing, water and heat transport are also coupled. Under a temperature gradient, water migrates from the warmer side to the colder side along the water films adsorbed to the soil particles under the temperature gradient. The amount of unfrozen water content in freezing soils is strongly affected by temperature. Increased knowledge of coupled water and heat transport in the freezing ground is, therefore, essential for understanding the sensitivity of mountain permafrost to future climatic perturbations.

Field investigations were conducted to have a better understanding of the thermal and hydrological processes on a rock glacier, below the Furggwanhorn peak, Turtmann valley (Switzerland). It was found that this rock glacier was in a very warm thermal state. The ground thermal state varied at different boreholes across the rock glacier, due to difference in solar radiation, topography, surface characteristics and seasonal snow cover. A coupled one-dimensional numerical model, based on SNOWPACK and HYDRUS, was developed to interpret the thermal behaviour at two boreholes, one on a slope inclined at about 30 ° and the other on a relatively flat area. The resulting numerical model showed that ground temperatures simulated agreed well with measured values at various depths in the two boreholes. Snow depth and the amount of liquid water content in the active layer were found to be the main factors influencing the ground thermal regime. The analysis based on a two-dimensional numerical model indicates that convective heat flux due to lateral groundwater flow has a very small influence on ground thermal regime in summertime. Nevertheless, an increase in soil moisture in the lower part of the slope caused by lateral groundwater flow tends to result in high ground temperature in wintertime.

Unidirectional column freezing experiments were performed to study coupled water and heat transport in freezing soils. An Am-241 gamma ray source and TDR were combined to measure total water content, unfrozen water content and ice content in freezing soils simultaneously. The results of soil column freezing experiments indicated that total water content distribution is affected by available pore space and the freezing front advance rate. It was confirmed that there is similarity between the soil water characteristic and the soil freezing characteristic of variably-saturated soil. Unfrozen water content is independent of total water content and affected only by temperature when the freezing point is reached.

A coupled water and heat transfer model was built, in which most hydraulic and thermal parameters were determined independently from experiments. The numerical model was tested by three soil column freezing experiments. The influences of impedance factor and air entrapment during freezing on total water content distribution were analysed. It was found that there is no need to apply an impedance factor to modify the hydraulic conductivity of freezing soil. The results of the numerical simulation also indicated that entrapped air during freezing affects ice accumulation in soil with high initial water content. It is essential to account for entrapped air when the soil has high initial water content. The improved model was used to analyse moisture migration in a soil column freezing experiment.

Zusammenfassung

Aufgrund seines Temperaturregimes um 0 °C ist der Permafrost in den Bergen sehr anfällig für die Effekte der Klimaerwärmung. Permafrost tritt in den Bergen meistens in der Form von Blockgletschern auf. In frühere Studien wurde gezeigt, dass die Hydrologie der Hauptgrund für den Rückgang der Permafrostgebiete in den Bergen ist. Die Hydrologie beeinflusst die Bodentemperatur über Schnee, Wasser und Eis. Wasser- und Wärmetransport sind während der Schneeschmelze auf der makroskopischen Ebene miteinander gekoppelt. Schmelzwasser sickert in den Untergrund, erwärmt den Boden auf 0 °C und erhöht den Bodenwasseranteil. Auch mikroskopisch gehen Wasser- und Wärmetransport Hand in Hand beim Gefrieren. Das Wasser wandert in dünnen Wasserfilmen entlang des Temperaturgradienten vom wärmeren Untergrund zur Frostgrenze. Der Bodenwassergehalt in gefrierenden Böden ist also stark von der Temperatur abhängig. Ein tiefes Verständnis des Zusammenspiels von Wasser- und Wärmetransport ist deshalb grundlegend um die Sensitivität von Permafrost in den Bergen auf künftige klimatische Veränderungen abzuschätzen.

Um die thermischen und hydrologischen Prozesse in einem Blockgletscher besser zu verstehen, wurden auf einem Blockgletscher unterhalb des Fruggwanghorn im Turtmanntal (Schweiz) Feldversuche durchgeführt. Messungen haben ergeben, dass der Blockgletscher in einem sehr warmen Zustand ist. Aufgrund von Unterschieden in der Sonneneinstrahlung, der Topographie, Oberflächencharakteristika und der saisonalen Schneedecke unterscheiden sich die gemessenen Temperaturregimes in den verschiedenen Bohrlöchern. Um die Temperaturverläufe von zweien der Bohrlöcher (eines auf einer um 30 ° geneigten Fläche, das andere in einem relativ flachen Gebiet) zu interpretieren wurde im Rahmen dieser Arbeit ein ein-dimensionales numerisches Modell, basierend auf SNOWPACK und HYDRUS, entwickelt. Die Modelle wurden anhand von Messdaten validiert und zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Temperaturverläufen in unterschiedlichen Tiefen. Es stellte sich heraus, dass die Schneetiefe und die Wassermenge in der aktiven Schicht die wichtigsten Rahmenbedingungen für das Temperaturregime des

Blockgletschers sind. Eine Analyse mit einem zwei-dimensionalen numerischen Modell hat gezeigt, dass der laterale Zu- und Abfluss von Grundwasser in den Sommermonaten nur einen marginalen Einfluss auf das Wärmeregime des Blockgletschers hat. Der Einfluss beschränkt sich auf eine höhere Bodentemperatur im Winter wenn die Bodenfeuchte in den Gebieten unterhalb der Flanke aufgrund von Grundwasserzufluss erhöht ist.

Einfach gerichtete Gefrierexperimente mit Säulenproben wurden durchgeführt um den gekoppelten Wasser- und Wärmetransport in gefrierenden Böden zu untersuchen. Der totale Bodenwassergehalt und die Anteile an ungefrorenem Wasser und Eis wurden gleichzeitig mit einer Am-241 Gammastrahlenquelle und TDR gemessen. Die Resultate zeigten, dass die Verteilung des totalen Wassergehalts von den verfügbaren Poren und der Geschwindigkeit der Gefrierfront abhängt. Eine Ähnlichkeit der charakteristischen Bodenwasserkurve und der charakteristischen Bodengefrierkurve von variabel-gesättigten Böden wurde festgestellt. Der Gehalt an ungefrorenem Wasser hängt nicht vom totalen Wassergehalt ab und erst von der Temperatur wenn der Gefrierpunkt erreicht ist.

Ein gekoppeltes Wasser- und Wärmetransfermodell wurde entworfen, bei welchem meist hydraulischen und thermischen Parameter unabhängig von den Experimenten bestimmt wurden. Das numerische Modell wurde anhand von drei Gefrierexperimenten mit Bodensäulen validiert. Die Einflüsse des Impedanzfaktors und der Lufteinschlüsse während dem Gefriervorgang auf die Verteilung des totalen Wassergehalts wurden untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass es unnötig ist einen Impedanzfaktor anzuwenden um die hydraulische Leitfähigkeit des gefrorenen Bodens anzupassen. Die Resultate der numerischen Simulation zeigten des weiteren, dass das Einschliessen von Luft während des Gefrierens die Eisanreicherung in Böden mit hohem anfänglichen Wassergehalt beeinflusst. Das validierte Modell wurde zur Analyse der Bewegung der Bodenfeuchte in Gefrierexperimenten mit Bodensäulen eingesetzt. Die Geschwindigkeit der Bodenfeuchtebewegung ist an der Gefrierfront am grössten wogegen sie am Rand der Gefrierzone, wo Wasser zu Eis gefriert, abnimmt.